



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ČÁSTICE V OVZDUŠÍ A MOŽNOSTI JEJICH MĚŘENÍ

ATMOSPHERIC PARTICLES AND THEIR MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Kantor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Bělka

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Radek Kantor**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Miloslav Bělka**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Částice v ovzduší a možnosti jejich měření

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Čistota ovzduší je v dnešní době vysoce diskutovaným tématem, jelikož je známo, že zvýšené množství vdechovaných částic má neblahé účinky na lidské zdraví. Vzduch může obsahovat částice z různých zdrojů a tedy částice různých velikostí a tvarů. Bakalářská práce by byla zaměřena na studium částic, které mohou být ve vzduchu obsaženy a na způsoby, jak je měřit

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše metod měření velikostí a koncentrace částic.
- Provedení měření vzorového aerosolu vybranou metodou.
- Zpracování a vyhodnocení výsledků experimentu.

Seznam doporučené literatury:

HINDS, W. C. Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles. Edition ed. New York ; Chichester: Wiley, 1999. ISBN 0471194107.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 7. 11. 2016



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Obsahem této práce je dozvědět se něco o základech aerosolů, jejich vlastnostech a různých způsobech měření. V dnešní době je téma částic v ovzduší velmi důležité, protože je známo, že částice v ovzduší mohou mít neblahé účinky na lidské zdraví. Měřením částic různých zdrojů lze tedy zjistit jejich vlastnosti a ohodnotit jejich nebezpečí. Jeden vzorek byl porovnán několika způsoby a následně analyzován. Za pomoci této analýzy poté byla zjištěna závislost velikosti na koncentraci částic a jejich možné nebezpečí.

Abstract

The aim of this work is to find out what aerosols are, what properties they possess and how they can be measured. In today's age, the term particles in the atmosphere, is highly talked about because it is known, that particles in the air can be inhaled and cause health problems. By measuring properties of particles from different sources, we can find out the danger level of such particles. One sample was measured by several different techniques and analyzed. Thanks to this analysis we can determine size distribution of particles and then their possible danger.

Bibliografická citace

KANTOR, R. *Částice v ovzduší a možnosti jejich měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miloslav Bělka

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Miloslavu Bělkovi za jeho odborné rady, veškerý čas, který mi byl věnován a veškerou pomoc při psaní bakalářské práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou svou bakalářskou práci Částice v ovzduší a možnosti jejich měření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce za použití odborné literatury a jiných zdrojů, které jsem uvedl a citoval v seznamu zdrojů.

V Brně dne

.....

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 8 |
| 2. Složení atmosféry..... | 9 |
| 3. Aerosoly | 10 |
| 4. Škodliviny v ovzduší..... | 12 |
| 5. Vliv částic na planetu a na člověka | 13 |
| 6. Měření aerosolů..... | 14 |
| 7. Experimentální měření | 19 |
| 8. Závěr | 25 |
| 9. Seznam použitých značek a symbolů..... | 26 |
| 10. Seznam zdrojů..... | 27 |
| 11. Přílohy..... | 29 |

1. Úvod

Druhy částic v ovzduší, jejich tvar, velikost a koncentrace, jsou velmi důležitou oblastí zkoumání. Částice v ovzduší mají podle svých vlastností veliký dopad jak na člověka, tak i na prostředí. Jejich vdechnutí může mít za následek zdravotní potíže, jako je třeba zanesení plicních sklípku a tím následné problémy s dýcháním, dráždivý kašel a nedostatek okysličování krve, což je spjaté s poškozením nervových cest. Z tohoto důvodu je měření částic v ovzduší velice důležité. Podle výsledného měření lze určit, zda jsou částice bezpečné, či nebezpečné a tím lze vyhodnotit potřebu limitace jejich tvorby, i když díky potřebám člověka je zcela nemožné zcela zamezit jejich tvorbě. Například tepelné elektrárny vypouštějí škodlivý prach do ovzduší, čím dochází k tvorbě částic, které mohou být škodlivé, ale je zcela nemyslitelné, že by byly všechny tepelné elektrárny odstaveny. Pokud se nenajde způsob zamezení tvorby vysokého počtu částic v ovzduší, tak studie částic v ovzduší, tedy aerosolů, bude v dohledné době velice důležitá.

2. Složení atmosféry

Atmosféra je plynný obal země. Skládá se z různých vrstev a sahá až do nadmořské výšky 560 km nad zemí [1]. Ovzduší, které dýcháme, se skládá z několika prvků. V procentuálním zastoupení je můžeme vidět v tabulce 1.

Tabulka 1. Složení zemské atmosféry [2]

| Plyn | Procentuální zastoupení |
|-----------------------|--------------------------------|
| Dusík | 78,08 % |
| Kyslík | 20,95 % |
| Argon | 0,93 % |
| CO₂ | 0,04 % |
| Neon | 0,00182 % |
| Helium | 0,00052 % |
| Metan | 0,00017 % |
| Krypton | 0,00014 % |
| Vodík | 0,00006 % |

Největším zastoupením prvků v atmosféře je kyslík a dusík. Představují většinu objemové hmotnosti atmosféry. Ostatní prvky mají mnohem menší zastoupení, ale to neznamená, že nejsou důležité, jak pro člověka, tak i pro Zemi.

3. Aerosoly

Je to heterogenní směs pevných nebo kapalných částic v plynném médiu, například vzduchu, avšak musí se vznášet dostatečně dlouho vzhledem k době pozorování. Jedná se tedy o dvoufázovou soustavu částice-vzduch [3]. Aerosoly se mohou rozdělit vzhledem k fyzikálním vlastnostem částic a zdrojům těchto částic. Toto rozdělení se nemusí striktně dodržovat, ale je všeobecně používáno. Aerosoly se můžou nacházet v různých podobách [4].

Bioaerosol – biologický původ. Může obsahovat viry, pily, bakterie, plísňové spory a jiné.

Oblak [Cloud Droplets] – aerosol s vysokou hustotou částic, který má viditelné hranice. Aerosol se považuje za oblak, je-li jeho hustota o 1 % větší než hustota čistého plynu.

Prach [Dust] – obsahuje pevné částice, které vznikly erozí nebo mechanickým rozrušováním původního materiálu. Obvykle se skládá z částic nepravidelného tvaru a větších než 0,5 μm .

Mlha [Fog] – kapalný aerosol, který vznikl kondenzací přesycených par.

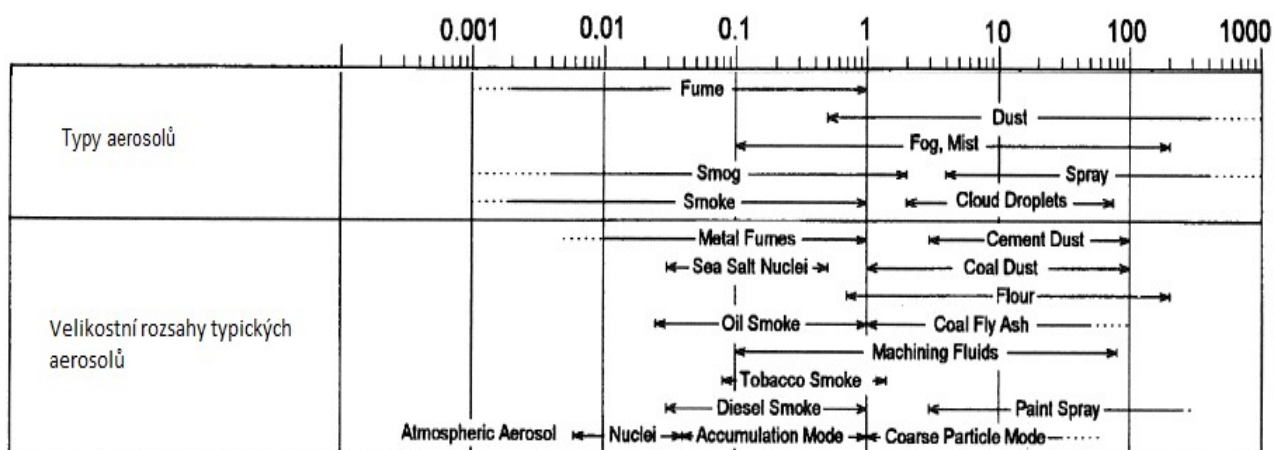
Kouř [Fume] – obsahuje pevné částice, které se vytvořily kondenzací plynných produktů spalování nebo jiných vysokoteplotních procesů. Částice často tvoří řetězce a aglomeráty.

Opar [Mist] – aerosol snižující viditelnost.

Kouř [Smoke] – aerosol s pevnými nebo kapalnými částicemi, které vznikly při nedokonalém spalování nebo kondenzaci přesycených par. Tyto částice mají velikost menší než 1 μm .

Smog [Smog] – aerosol obsahující pevné nebo kapalné částice, jež jsou produkty fotochemických reakcí UV záření s uhlovodíky a oxidy dusíku. Termín smog je kombinací slov „smoke“ a „fog“ a často se používá pro označení všech znečišťujících látek včetně plynných složek.

Sprej [Spray] – aerosol vzniklý mechanickým nebo elektrostatickým rozpadem kapaliny.



Obr. 1 Velikostní rozložení druhů aerosolů (μm) [5]

Typ aerosolu udává, o jaký druh částic se může jednat. Podle typu částic aerosolu se poté liší i jejich tvar. Kapalně částice mají kulovitý tvar, zatímco tuhé částice mají nepravidelný tvar. Nejčastěji je aerosol směsí jak tuhých, tak i kapalných částic. Důležitou vlastností

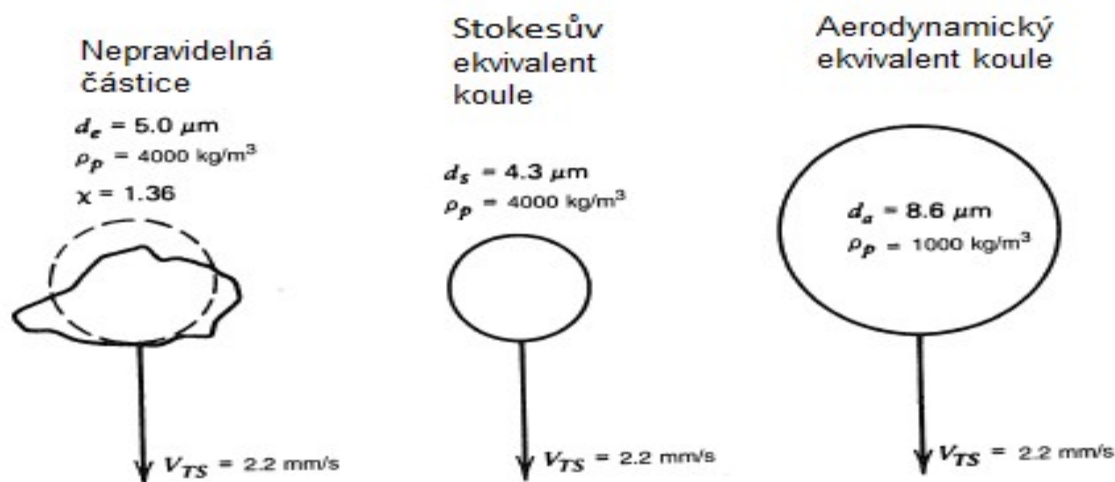
aerosolů je velikost částic. Částice aerosolů se pohybují v rozmezí od 0,001 až po 100 μm a dle velikosti je lze dělit do 3 skupin:

a) Hrubé (1–100 μm)

b) Jemné (0,1 – 1 μm)

c) Ultrajemné (0,001 – 0,1 μm)

Částice většinou nemají stejný tvar, objem nebo hustotu. Z tohoto důvodu se zavádí pojem ekvivalentní průměr, který pomáhá s porovnáváním různých částic. Jedním takovýmto druhem průměru je aerodynamický ekvivalentní průměr. Tento průměr je definován jako průměr kulovité částice o hustotě 1000 kg/m^3 (průměr dešťové kapky) se stejnými aerodynamickými vlastnostmi, jaké má námi sledovaná částice. Podobný, ale méně používaný je Stokesův průměr. Jedná se o průměr koule, která má stejnou hustotu a rychlost usazování (v_{TS}), jakou má sledovaná částice. Na tvaru částice tedy nezáleží, ale důležité je její aerodynamické chování (obrázek 2).



Obr. 2 Ekvivalentní průměry částic [5]

Pokud velikost částic aerosolu je téměř stejná, tak se jedná o monodisperzní aerosol. Tento se však vyskytuje pouze v laboratorních podmínkách, k řešení chování různých aerosolů, v závislosti na velikosti částic. V přírodě se především vyskytuje polydisperzní aerosol, který má různé velikosti částic.

Fyzikální vlastnosti se také liší v závislosti na velikosti částic. Menší částice se řídí při transportu Brownovým pohybem, zatímco velké částice jsou převážně ovlivňovány gravitačními a setrvačnými silami. Pod pojmem velké částice si představujeme částice větší než 1 μm .

4. Škodliviny v ovzduší

Částice, vytvořené lidskou činností, které způsobují problémy právě pro člověka a životní prostředí, se nazývají poléťavý prach (PM z anglického názvu „particulate matter“). Je to pojem pro částice nano a mikrometrových rozměrů. Částice mají své specifické označení podle velikosti – například PM10 označuje poléťavý prach o aerodynamickém průměru menším než 10 μm . Vzniká při spalovacích procesech, tavení rud, ale také z půdy zbavené vegetačního krytu. Čím menší průměr částice má, tím déle zůstává v ovzduší a může být vdechnuta. Průnik částic do dýchacích cest člověka je ovlivněn také velikostí částic. Částice o velikosti větší než 10 μm jsou zachyceny v horních cestách dýchacích, menší mohou pronikat do dolních dýchacích cest a jsou tak potenciálně nebezpečnější. Částice menší než 2,5 μm se mohou dostat až do plicních sklípků, kde probíhá výměna plynů mezi vzduchem a krevním řečištěm. Pro částice menší než 2,5 μm se tedy zavádí pojem PM2,5. Tyto částice vznikají převážně ze zdrojů vytápění a jejich koncentrace jsou nejvyšší za zhoršených podmínek během chladného období. Zavádí se tak dva pojmy, které označují výskyt množství částic a škodlivin v ovzduší [6].

Emise – tento pojem se zabývá počtem emitovaných neboli vypouštěných látek do ovzduší z různých zdrojů, jako jsou komíny, elektrárny a továrny. Měření se provádí přímo u zdroje a zavádí se tedy pojem, emisní limit, který nám určuje dovolený počet vypuštěných látek do ovzduší. Je určen v jednotkách kg/den nebo t/rok.

Imise – jsou to nežádoucí látky v ovzduší a jejich množství v zemské atmosféře. Zavádí se tedy pojem imisní limit, který určuje nejvyšší přípustnou hodnotu úrovně znečištění ovzduší. Jednotkou je $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Při lidské činnosti se do ovzduší nedostávají jenom škodlivé částice, které se vzduchem tvoří aerosol, ale i škodlivé plyny, které mají také negativní vliv. Uvedu některé takovéto plyny a jejich vliv na zdraví [7].

Oxid siřičitý (SO₂)

Narušuje pomocí chemických reakcí fotosyntézu a v ovzduší může způsobovat kyselé deště.

Vznik:

Spalování fosilních paliv.

Vliv na zdraví:

Oxid siřičitý působí dráždivě na sliznice dýchacích cest. Podporuje záněty průdušek a astma.

Povolený imisní limit: 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Oxid uhelnatý (CO)

Je jednou z nejběžnějších a nejrozšířenějších látek znečišťujících ovzduší.

Vznik:

Vzniká nedokonalým spalováním uhlíkatých materiálů a jako produkt v některých průmyslových a biologických procesech.

Vliv na zdraví:

Oxid uhelnatý působí na srdce, cévní a nervový systém. Při jeho nízkých koncentracích může zdravý člověk pociťovat únavu. Při jeho vyšších koncentracích může dojít k poruchám vidění a koordinace, bolestem hlavy, závratím. Velmi vysoké koncentrace jsou smrtelné.

Povolený imisní limit: 10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

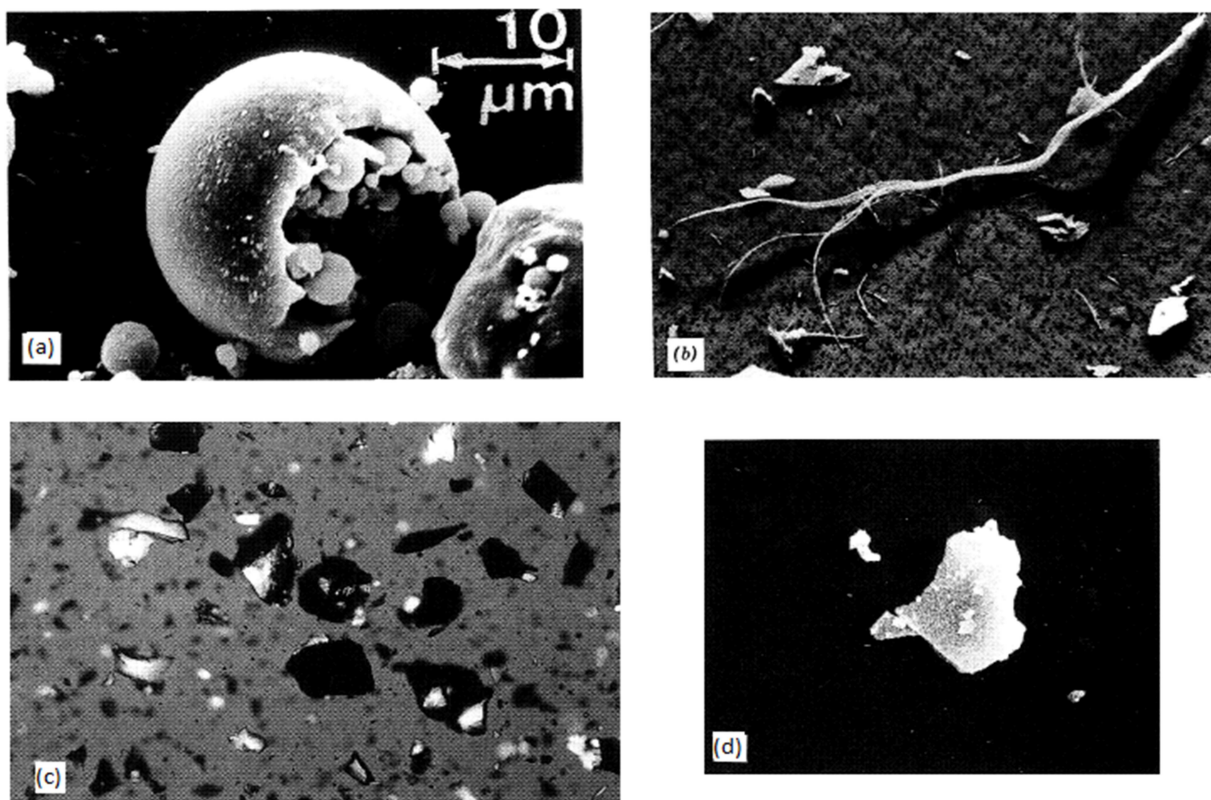
5. Vliv částic na planetu a na člověka

Člověk

Znečištění ovzduší je chemický, fyzikální, popřípadě biologický činitel. Má vliv na fyziologii člověka, a tudíž nás může ohrozit na zdraví či životě. Nejčastějším a nejzřejmějším účinkem znečištěného ovzduší je poškození dýchacích cest a následky s tím spjaté. Částice, co se dostanou až do plicních sklípků, mohou způsobit zánět na plicích, pokud se jich organismus nedokáže zbavit. Organismus se částic v plicích zbavuje za pomoci hlenu, který je vykašláván. Pokud částice nejsou odstraněny z plic, mohou způsobit omezení okysličování krve a tím způsobit poškození nervových drah. Částice radonu mohou dokonce způsobit i rakovinu plic. Je tedy snahou, co nejvíce snížit výskyt znečišťujících prvků v zemské atmosféře, a právě proto se zavedl pojem PM částice. Jedním, z nejčastějších zdrojů takovýchto prvků, je mobilní průmysl, což jsou právě auta nebo jakékoliv jiné vozidlo na fosilní paliva.

Prostředí

Je těsně spjata se znečišťováním ovzduší a vod. Kyselé deště mění vlastnosti půdy, které následně způsobují odumírání lesů. Znečištěné ovzduší mění některé přírodní vlastnosti zemské atmosféry. Jedním takovým znakem je zmenšování vrstvy stratosférického ozónu. Z imisí se v půdě hromadí těžké kovy, pesticidy a radioaktivní látky. Tyto látky mohou způsobit špatný růst flóry, popřípadě i neschopnost růstu flóry [8].



Obr. 3 (a) Uhelný popel, (b) Azbestové vlákno, (c) Sopečný prach, (d) Křemičitý prach [5]

6. Měření aerosolů

V závislosti na daném problému, je možné při měření aerosolů zkoumat jejich velikost, tvar, koncentraci, hmotnost nebo i chemické složení částic. Z hlediska polévatého prachu jsou velice důležité parametry velikost a koncentrace částic. Výsledkem měření nejčastěji bývá hmotnostní, či početní zastoupení částic v různých velikostních třídách. Přesnost a rozlišení měření závisí na použité metodě.

Při měření aerosolů zkoumáme vlastnosti nebo chování částic při různých podmínkách. Měřicí přístroje pracují na základě různých principů a lze je tudíž aplikovat na částice jen o určitých parametrech. Při komplexnějších měřeních se tedy často používá kombinace různých měřicích metod nebo přístrojů [9].

a) Měření aerodynamického průměru

Měření aerodynamického průměru závisí na typu částic aerosolu. Částice mohou mít různou hustotu, a tedy různou hybnost. Aerodynamický průměr nám tedy pomáhá porovnat částice různých tvarů, velikostí a hustot. Problém ale nastává u tuhých částic s jejich nepravidelným tvarem. U těchto částic je potřeba měřit ekvivalentní průměr, což je průměr kulové částice, která má stejnou hodnotu fyzikálních vlastností, jako má sledovaná částice. Existuje spousta měřicích zařízení, které nám tuto hodnotu mohou změřit.

Aerodynamický čítač částic

Z anglického Aerodynamic Particle Sizer, dále jen APS, provádí měření velikostní distribuce částic v reálném čase. Měří částice v rozsahu $0,5 - 20 \mu\text{m}$ za pomoci intenzity rozptylu světla v ekvivalentním optickém rozsahu $0,37 - 20 \mu\text{m}$ [10].

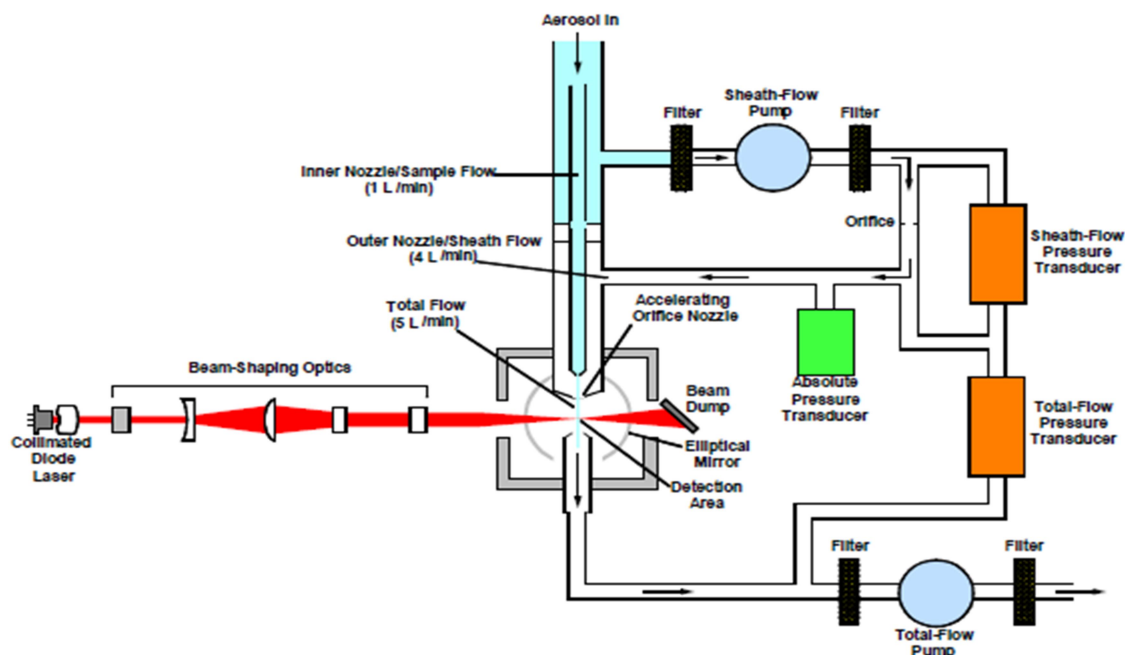
Částice prolétá tryskou a následně přes 2 laserové paprsky (Obrázek 5). V závislosti na velikosti a hustotě částic se mění rychlost, se kterou částice opustí trysku. Spočítá se doba průletu mezi dvěma paprsky a pomocí této doby lze zjistit aerodynamický průměr.

Aplikace:

- Inhalační toxikologie
- Studie přenosu léků
- Atmosférické studie
- Monitorování ovzduší
- Testování kvality vnitřních prostor
- Filtrovací a vzduch čistící testování
- Testování aerosolových charakteristik



Obr. 4 APS [10]



Obr. 5 Schéma principu APS [11]

Kaskádové impaktory

V angličtině se často užívá zkratka ACI (Anderson Cascade Impactor), operuje na principu hybnosti částic. Každá úroveň impaktoru se skládá z trysky nebo trysek, skrz které je vzorek nasáván a směřován k povrchu sběracího plátu pro danou úroveň (Obrázek 7) [12].

Zdali určitá částice dopadá na daný sběrací plát, závisí na jejím aerodynamickém průměru. Částice mající dostatečnou hybnost dopadá na povrch sběracího plátu, zatímco menší částice zůstanou zachovány v proudu vzduchu a budou pokračovat do další úrovně, kde je proces opakován.

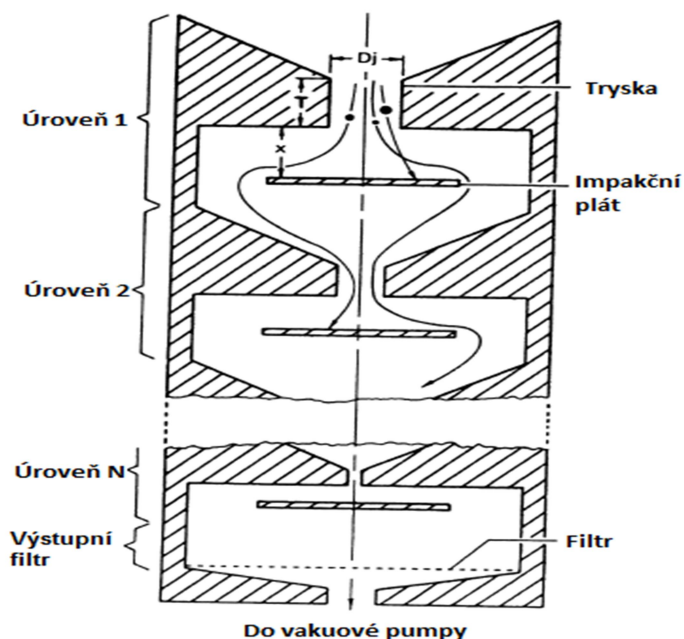


Obr. 6 ACI[12]

Úrovně jsou sestaveny na sobě nebo v rovině podle snižující se velikosti částic, které jsou schopny zachytit. Tím, jak se trysky zmenšují, rychlost proudění vzduchu se zvětšuje. V důsledku toho jsou menší částice postupně sesbírány. Na konci testu se hmota částic sesbírání z jednotlivých úrovní za pomoci vhodného roztoku a následně je analyzována, obvykle za použití HPLC (z anglického high-performance liquid chromatography) což je chromatografická technika sloužící k izolaci jednotlivých složek, a tak k následnému zjištění daného množství různých částic. Běžně používaný kaskádový impaktor má 8 různých úrovní a dokáže tedy rozlišit částice v osmi velikostních třídách.

Aplikace:

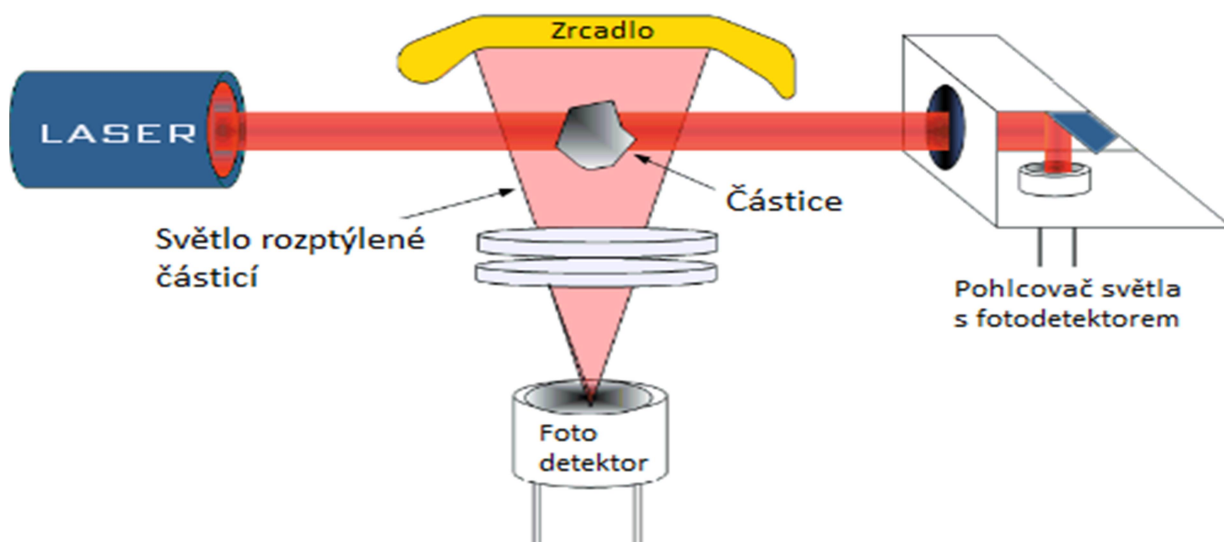
- Farmaceutický výzkum
- Laboratorní pokusy
- Inhalační toxikologie



Obr. 7 Vnitřní schéma ACI [5]

b) Optické čítače

Jsou používány pro měření čistoty vzduchu v čistých prostorech nebo obytných místnostech. Pracují na principu rozptýlení světla dopadajícího na částici. Jsou jedny z přenosných typů měřičů, a tak se s nimi dá měřit přímo na místě. Princip takovýchto optických čítačů je poměrně jednoduchý. Laserový paprsek dopadá na částici, kde se pak rozptýlí. Díky tomu už snadno lze zjistit počet částic procházející paprskem, a to na základě počtu pulzů rozptýleného světla na detektoru. OPC (Optical Particle Counter) dokáže také na základě intenzity rozptýleného světla určit velikost částice. Rozptyl světla je závislý na tvaru částice a pro měření jsou tedy ideální kulové částice [13].



Obr. 8 Schéma principu optických čítačů [13]

SOLAIR 3100

Tento přístroj používá dlouhotrvající laserovou diodu, jako zdroj světelného paprsku pro měření částic. Ovládá se za pomoci dotykové obrazovky a je schopen i vnitřního tisku ke snadnému zachování naměřených údajů. Dokáže měřit částice o velikosti 0,3 – 25 μm , díky čemu je schopen zjistit potenciálně škodlivé částice v ovzduší [14].

Aplikace:

- Laboratoře
- Obytné prostory

c) Mikroskopie

Používá se k podrobnějšímu zkoumání částic, jako je velikost a tvar. Na rozdíl od předchozích metod, můžeme pozorovat i jejich strukturu. Jedná se zejména o částice mikrometrových velikostí, ale v dnešní době se už začínají měřit částice nanometrových velikostí. Pro takto malé částice se využívá elektronová mikroskopie, kde se využívá elektronový mikroskop.

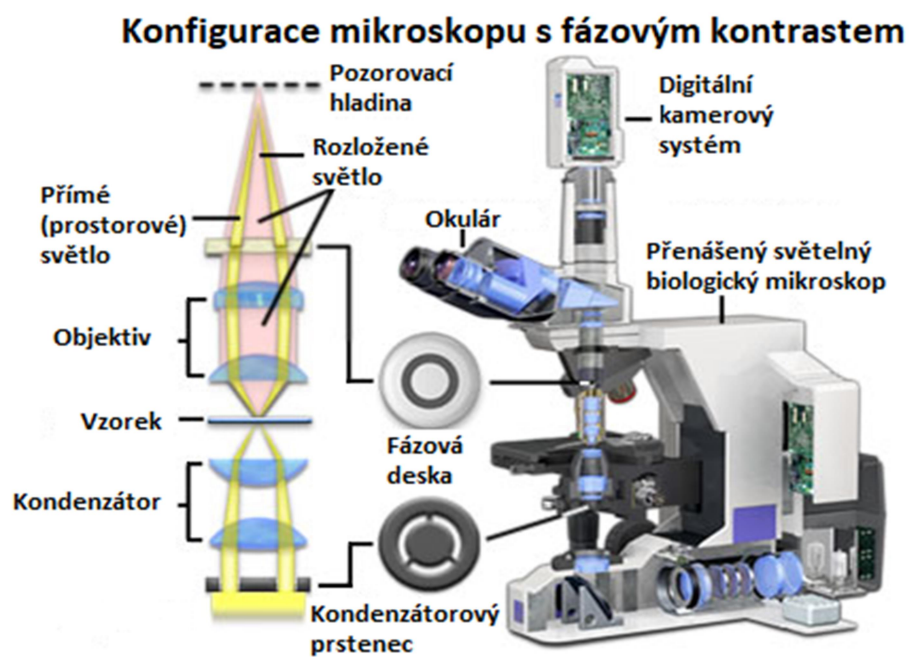
Vzorek je usazován na filtru a pak je ostřelován proudem částic, což mohou být fotony, elektrony, protony, neutrony nebo ionty. Vzniklé záření po srážce proudu částic se vzorkem je detekován a pomocí něj je vykreslen obraz vzorku. Jedním ze zařízení je například optický mikroskop, který bude popsán níže [15].

Optický mikroskop s fázovým kontrastem

Aby byl schopen měřit, musí být nastaven správný kontrast mezi pozadím a objektem tak, aby objekt alespoň částečně pohlcoval světlo. Kontrast je ale možno zvýšit. Toho lze dosáhnout využitím fázového kontrastu. Jedná se hlavně o transparentní objekty, které nejsou pouhým okem v mikroskopu vidět.

Na těchto objektech dojde kvůli rozdílnému indexu lomu k posunu světelné fáze. Toto ale okem nelze pozorovat. Princip tohoto zařízení, ale spočívá ve změně fázových rozdílů na změny intenzity světla, které už ale lidské oko vidí.

Objekty s vyšším indexem lomu, se pak jeví světlejší vůči pozadí (negativní fázový kontrast) nebo tmavší vůči pozadí (pozitivní fázový kontrast). Fázového kontrastu lze dosáhnout přidáním speciální clony do kondenzoru a fázové destičky do objektivu mikroskopu [16].

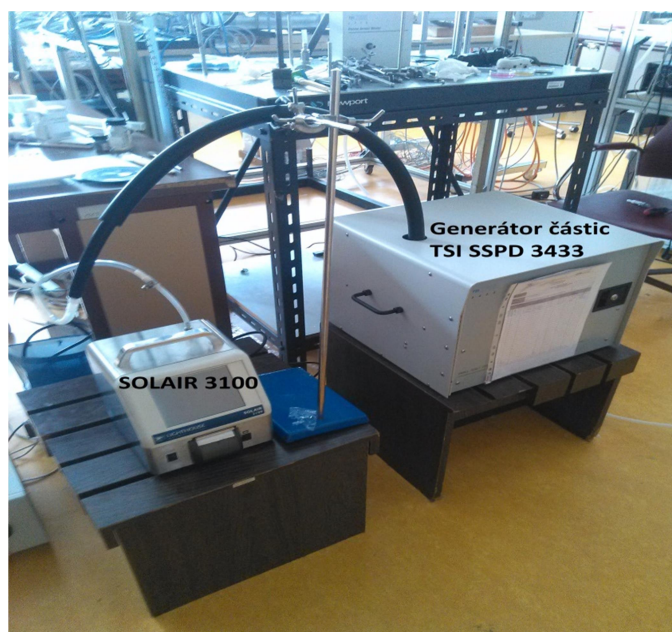


Obr. 9 Optický mikroskop s fázovým kontrastem [17]

7. Experimentální měření

Výstupem experimentální části je porovnat různé metody měření a analyzovat jejich rozdíly. Experimentální měření proběhlo třemi různými způsoby, viz kapitola 6. Kontrolním aerosolem byly niklové částice, které byly proměřeny třemi způsoby a následně byly tyto způsoby porovnány. U měření aerodynamického průměru bylo využito APS, zatímco SOLAIR 3100 a optický mikroskop byl využit pro měření geometrického (skutečného) průměru. Při měření za pomoci APS, byly vybrány celkově tři aerosoly. Jednalo se o předem zmíněné niklové částice, částice chitosanu a křemičité částice. Tyto částice sloužily k porovnání kontrolního aerosolu při měření pomocí APS a k zjištění rozdílů mezi různými částicemi.

Pro samotné měření bylo potřeba částice dostat do vznosu. K tomu byl použit generátor částic TSI Smale Scale Powder Disperser 3433. U tohoto generátoru je potřeba částice rovnoměrně nanést na otočný kotouč, který je připevněn pod stacionárně umístěnou Venturiho trubicí. Částice se nanášejí podle potřeby. Je možné nastavit dvojí otáčení kotouče a to ve směru a proti směru hodinových ručiček. Důležité je dále nastavit rychlost otáčení kotouče, která ovlivňuje množství nasávaných částic, a tedy výslednou koncentraci částic na výstupu z generátoru. Po přípravě je do generátoru přiveden vzduch z kompresoru a po spuštění generátoru částic začne na trysce vznikat podtlak, který nasává částice do trysky, a skrz hadice jsou hnány do měřicího přístroje. Částice jsou následně analyzovány za pomoci specializovaných programů. Pro APS je to Aerosol Instrument Manager, zatímco pro mikroskop Artemis/ATK Capture. Tyto programy jsou schopny analyzovat údaje z měřicích přístrojů a tak zjistit množství částic v závislosti na jejich velikosti. SOLAIR 3100 má zabudovaný optický display, ze kterého jde vyčíst výsledky měření a podle potřeby jdou i vytisknout pomocí zabudované tiskárny. Při několika měřeních lze pozorovat fluktuaci hodnot. Toto je způsobeno nejčastěji nerovnoměrným rozložením částic v generátoru, a proto je potřeba provést alespoň tři měření, které jsou následně zprůměrovány, čímž dostanu nejpresnější hodnoty. Pro snadné pozorování se výsledné hodnoty vynášejí do sloupcového grafu.

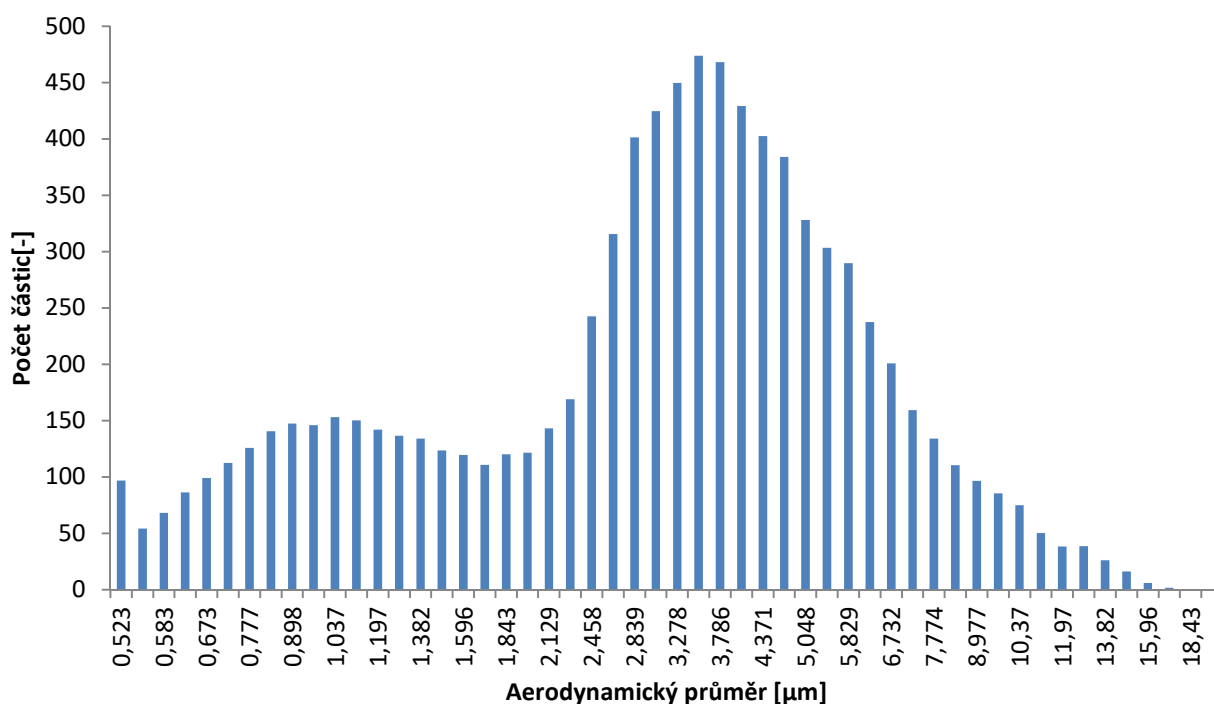


Obr. 10 Měřicí aparatura

Měření niklových částic pomocí APS

Tab. 2 Průměrné hodnoty niklových částic

| | Měření | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | Průměr |
| Medián (μm) | 3,25 | 3,33 | 3,57 | 3,38 |
| Průměrná hodnota (μm) | 3,59 | 3,69 | 4,01 | 3,77 |
| Geometrický průměr (μm) | 2,83 | 2,92 | 3,23 | 2,99 |
| Modus (μm) | 3,52 | 3,52 | 3,52 | 3,52 |
| Geometrická směrodatná odchylka (μm) | 2,08 | 2,07 | 2,02 | 2,06 |
| Celková koncentrace ($\#/\text{cm}^3$) | 301,27 | 304,54 | 290,95 | 298,92 |



Obr. 11 APS - Velikostní rozložení niklových částic

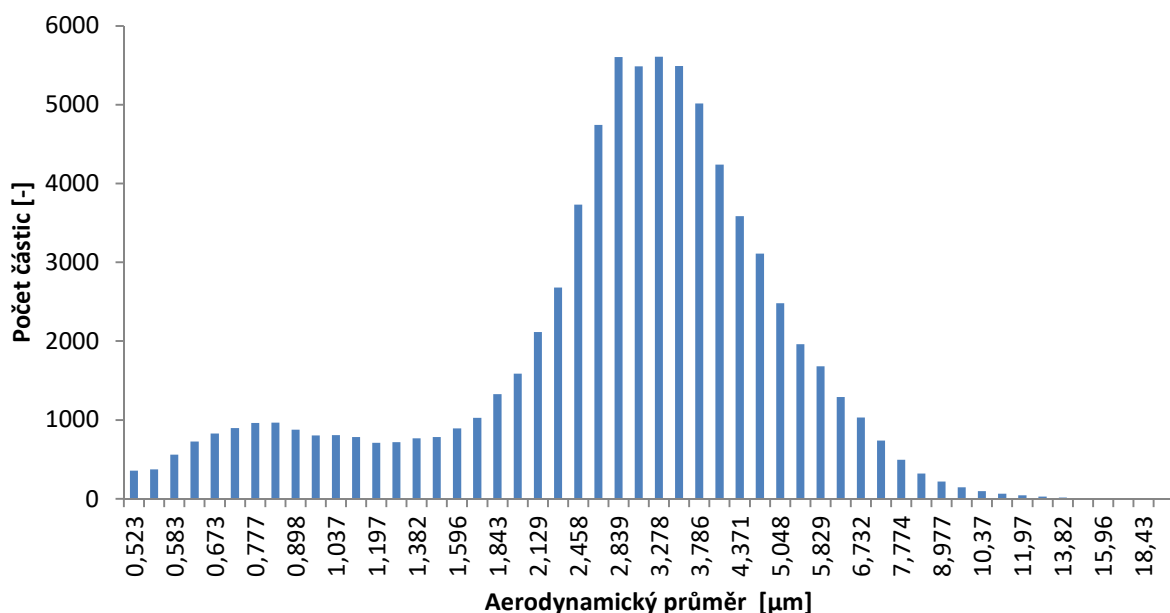
Naměřené hodnoty obsahují počet částic v různých velikostních třídách. Tyto data jsou velice obsáhlá, a je proto je vhodné zapisovat ve statistickém tvaru. Medián určuje prostřední hodnotu naměřených dat, což pro niklové částice vychází na 3,38 μm . Průměrná hodnota je aritmetický průměr, geometrický průměr určuje průměrnou hodnotu růstu dat, modus určuje nejčastější hodnotu dat, směrodatná odchylka zase možnou chybu naměřených hodnot a celková koncentrace určuje počet částic na jednotku objemu. Z grafu je možno pozorovat, že nejčastěji se niklové částice nachází ve velikosti kolem 3,5 μm , což odpovídá modusu, ale jsou rozloženy v rozsahu 0,5 – 16 μm . Jedná se tedy o polydisperzní částice. Po srovnání statistických údajů s grafem lze pozorovat, že údaje sice dovolí pozorovat aerosol, ale graf má tu výhodu, že můžeme vidět celkové chování aerosolových částic v celém velikostním spektru.

Ze statických údajů lze za pomoci směrodatné odchylky zjistit, jestli se jedná o monodisperzní nebo polydisperzní částice.

Měření částic chitosanu pomocí APS

Tab. 3 Průměrné hodnoty částic chitosanu

| | Měření | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | Průměr |
| Medián (μm) | 3,15 | 3,11 | 3,07 | 3,11 |
| Průměrná hodnota (μm) | 3,31 | 3,25 | 3,21 | 3,26 |
| Geometrický průměr (μm) | 2,86 | 2,82 | 2,76 | 2,81 |
| Modus (μm) | 3,28 | 2,84 | 2,84 | 2,99 |
| Geometrická směrodatná odchylka (μm) | 1,79 | 1,78 | 1,81 | 1,79 |
| Celková koncentrace ($\#/\text{cm}^3$) | 2424,25 | 2620,81 | 2573,41 | 2539,49 |



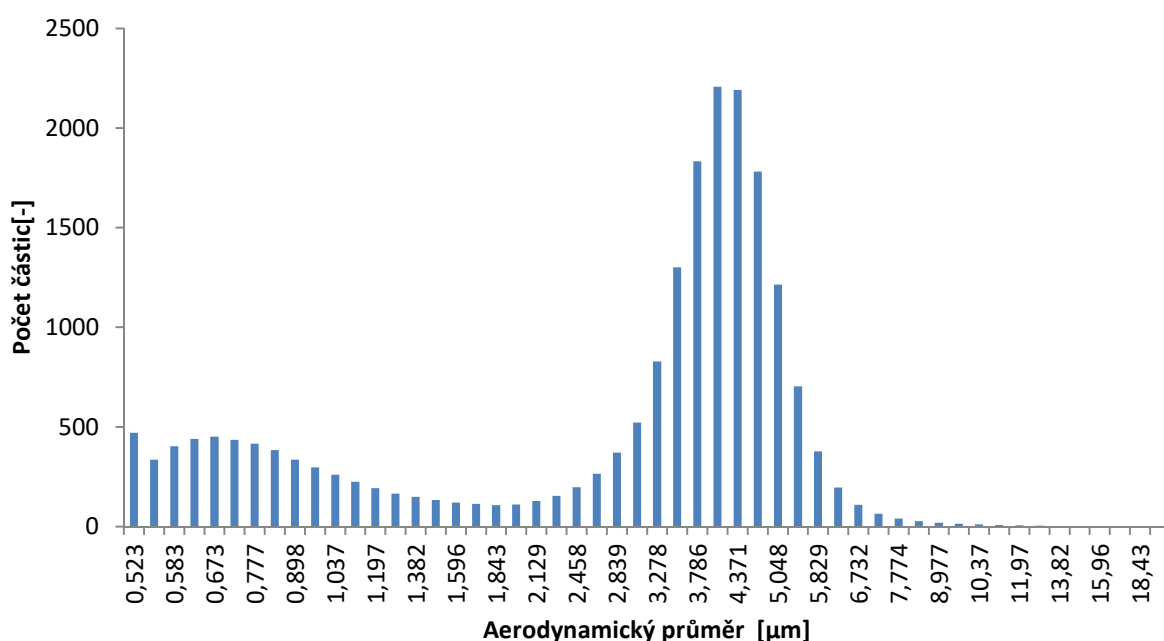
Obr. 12 APS - Velikostní rozložení částic chitosanu

Částice chitosanu mají podobné velikostní rozložení, jako částice niklu, ale lze pozorovat, že vzorek neobsahoval tak velké částice, jako vzorek niklových částic. Při těchto velikostech se částice lehce dostanou do plic a ovlivní jejich funkci, což je ale podstatou těchto částic, protože jejich hlavní účel je hlavně přenos léčiv do plic. Příkladem přístroje, který obsahuje tyto částice a splňuje tuto funkci je například inhalátor.

Měření křemičitých částic pomocí APS

Tab. 4 Průměrné hodnoty křemičitých částic

| | Měření | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | Průměr |
| Medián (μm) | 3,82 | 3,79 | 3,79 | 3,81 |
| Průměrná hodnota (μm) | 3,39 | 3,35 | 3,36 | 3,37 |
| Geometrický průměr (μm) | 2,78 | 2,74 | 2,74 | 2,75 |
| Modus (μm) | 4,37 | 4,07 | 4,07 | 4,17 |
| Geometrická směrodatná odchylka (μm) | 2,07 | 2,07 | 2,07 | 2,07 |
| Celková koncentrace ($\#/\text{cm}^3$) | 739,87 | 716,73 | 739,34 | 731,98 |



Obr. 13 APS - Velikostní rozložení částic křemíku

Tyto křemičité částice by měly být monodisperzní. Měli by tedy mít stejnou velikost a měli by tedy být koncentrovány na jednom aerodynamickém průměru, což z grafu nevyplývá. Z tabulky 4 lze také pozorovat, že směrodatná odchylka je $\pm 2,07 \mu\text{m}$. Vysoká směrodatná odchylka je dána hlavně vyšším počtem částic menších než $1 \mu\text{m}$. Tento menší velikostní vrchol se objevuje pravidelně u všech měřených částic. Jedná se tedy o nějakou určitou chybu měření, která mohla být způsobena několika možnostmi. Nejpravděpodobnější je chyba generace částic. Muselo tedy dojít ke kontaminaci vzorku v generátoru částic. Mohlo ale taky dojít k infiltraci částic, které se volně nalézají ve vzduchu, což by tedy byla chyba filtru, nebo generátoru. Před každým měřením, by se tedy měl generátor částic pročistit a přeměřit, jestli generátor negeneruje částice i bez vzorku. Při velkém množství vzorků, je ale po každém měření vyčištění generátoru časově náročné, a pokud tedy nedojde k pročištění, je potřeba změřit, co generátor bez vzorku generuje a tyto částice následně odečíst od naměřeného vzorku. Tímto způsobem by se chyba objevit už neměla.

Měření niklových částic pomocí SOLAIR 3100

Tab. 5 Naměřené hodnoty niklových částic na optickém přístroji

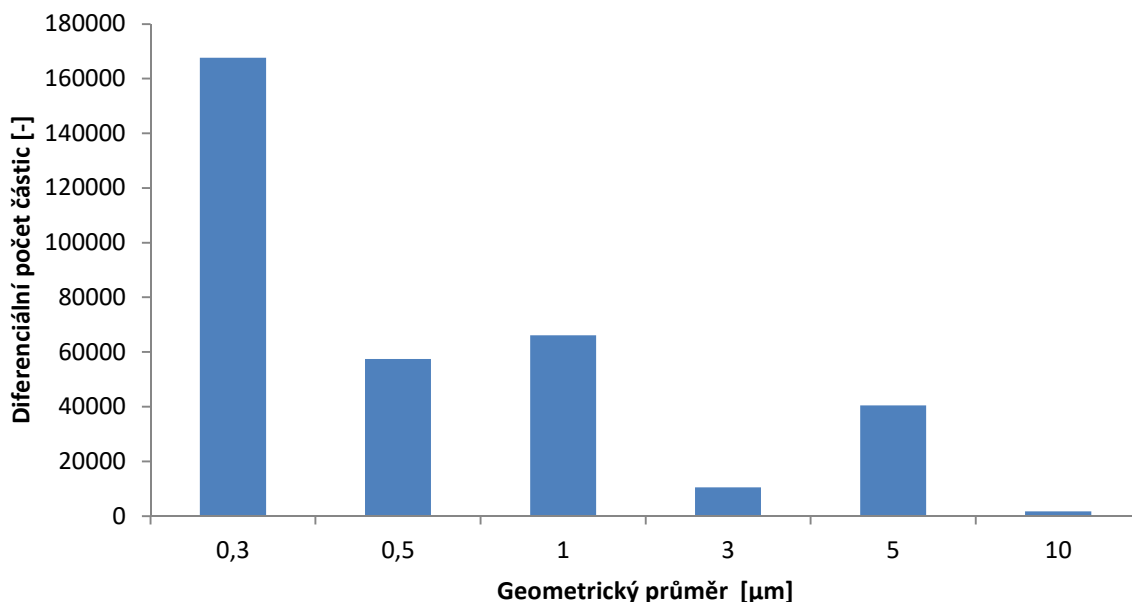
| D [μm] | Δ [-] |
|---------------------|--------------|
| 0,3 | 165004 |
| 0,5 | 50432 |
| 1 | 56713 |
| 3 | 9800 |
| 5 | 38508 |
| 10 | 1100 |

| D [μm] | Δ [-] |
|---------------------|--------------|
| 0,3 | 164532 |
| 0,5 | 55051 |
| 1 | 64675 |
| 3 | 10457 |
| 5 | 42883 |
| 10 | 1950 |

| D [μm] | Δ [-] |
|---------------------|--------------|
| 0,3 | 173241 |
| 0,5 | 66946 |
| 1 | 76857 |
| 3 | 11148 |
| 5 | 40105 |
| 10 | 2060 |

Tab. 6 Průměrné hodnoty niklových částic na optickém přístroji

| D [μm] | Δ [-] |
|---------------------|--------------|
| 0,3 | 167592 |
| 0,5 | 57476,3 |
| 1 | 66081,7 |
| 3 | 10468,3 |
| 5 | 40498,7 |
| 10 | 1703,33 |

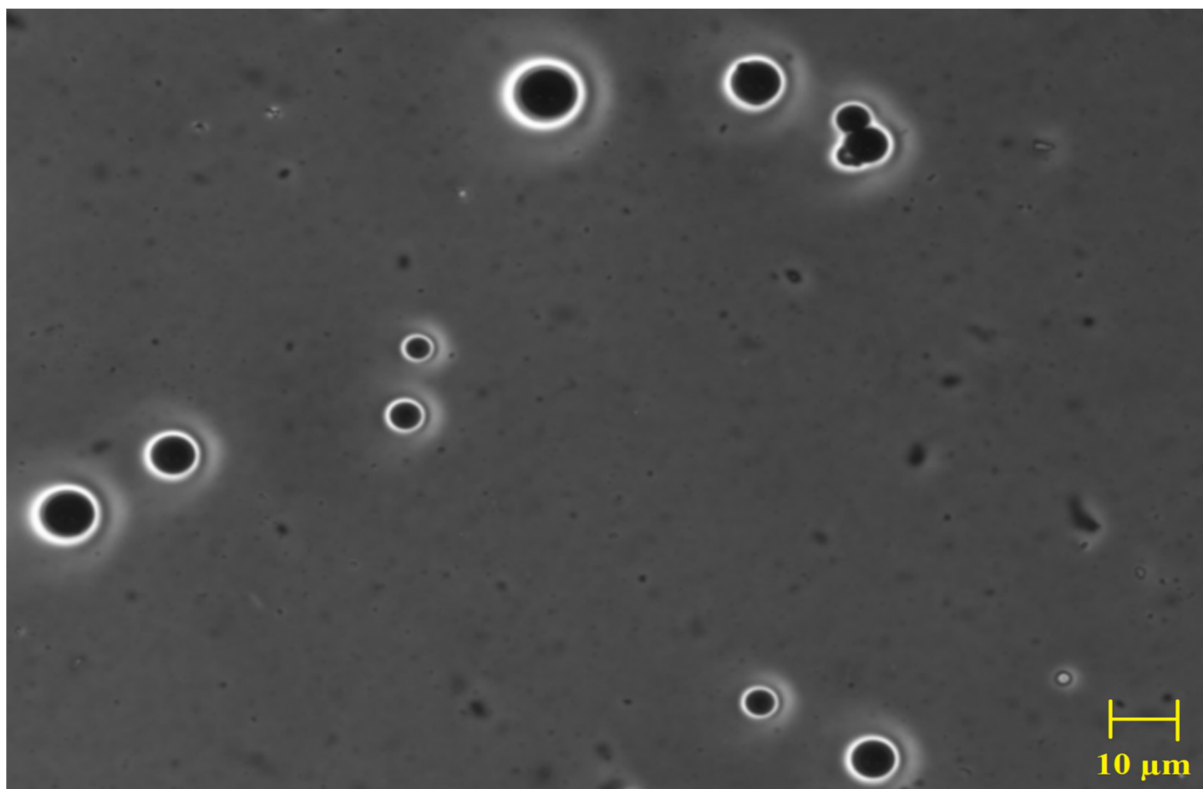


Obr. 14 SOLAIR 3100 - Velikostní rozložení niklových částic

Z naměřených dat zde lehce pozorovat, že rozlišení SOLAIR 3100 je mnohem menší než APS. Dokonce i měření množství částic se liší. Počet velikostních tříd je podstatně menší než u APS a množství částic je počítáno jako součet všech částic do dané velikosti. Tedy množství částic o velikosti 0,3 μm , jsou ve skutečnosti všechny částice v intervalu 0,3 – 0,5 μm . Je třeba si tedy dát na toto při měření pomocí optickým měřících zařízení pozor. Jedná se ale o

přenosné měřiče, u kterých je jenom potřeba vědět, kterých částic je velikostně nejvíce. Při měření pomocí APS z grafu vyplývalo, že největší počet niklových částic je v aerodynamickém průměru 3,38 μm . Po srovnání s grafem z měření na SOLAIR 3100, to ale nevyplývá. Je potřeba si uvědomit, že APS měří aerodynamický průměr, zatímco SOLAIR 3100 geometrický, neboli skutečný průměr částic. Vyplývá ale otázka, co jsou ty částice ve velikostní třídě 0,3 μm ? Jedná se o nějaké malé částice, které kontaminovaly vzorek v generátoru, nebo jde o infiltraci částic z okolí. Nelze tedy s jistotou říct, kde se nachází největší počet niklových částic.

Měření niklových částic pomocí optického mikroskopu s fázovým kontrastem



Obr. 15 Niklové částice pod optickým mikroskopem s fázovým kontrastem

Pro poslední měření byl použit mikroskop Nikon Eclipse E200 s objektivem se zvětšením 40x. Pro měření na mikroskopu bylo důležité nechat částice usadit na filtru a ten pak zprůhlednit acetonem. Výhodou optického mikroskopu je schopnost pozorovat tvar částic, z čehož lze pozorovat, že niklové částice mají kulovitý tvar. Lze i pozorovat, že se liší i jejich geometrický průměr neboli skutečná velikost částice. Pro zjištění velikosti částic je třeba určit rozměry snímané oblasti a to tak, že se nafotí za pomoci kamery na mikroskopu Atik 314E mikroskopické pravítko. Pomocí něhož lze už snadno zjistit velikost jednotlivých částic, ale je to časově náročné. Další nevýhodou je, že nelze s jistotou říct, jestli bylo pozorováno celkové velikostní spektrum částic, jelikož na mikroskopu vidíme pouze část filtru, na kterém jsou usazené částice. Klidně můžou existovat částice, které jsou větší nebo i menší. Nejlépe je provést pozorování na více oblastech filtru a ujistit se, že byly zaznamenány nejčastější velikosti. Z obrázku 15 můžeme pozorovat niklové částice kolem 5 – 10 μm .

8. Závěr

Práce se týkala částic v ovzduší a jejich měření. Částice v ovzduší jsou všeobecně označovány, jako aerosoly. Aerosoly jsou dvoufázové soustavy, které se skládají ze vzduchu a částic. Způsoby měření částic jsou různé. Pro měření aerodynamických průměrů jsem využil APS, zatímco pro geometrický průměr SOLAIR a optický mikroskop. Funkce těchto přístrojů byla popsána v teoretické části této práce. Při měření, je vzduch kontaminován částicemi z okolí, a je tedy nutno použít filtr, aby nedošlo ke kontaminaci měřeného vzorku. Při měření, je důležité provést první měření na prázdno, a ujistit se, že v generátoru nejsou usazeny částice, a že měření nebude tedy ovlivněno. Při měření několika vzorků za sebou, je nejlépe generátor vyčistit, jinak by mohlo nastat měření stávajících i předchozích částic, což může ovlivnit výsledné údaje. Podle potřeby je také nutno si uvědomit, jaký přístroj budu vlastně potřebovat. Jestli chci znát tvar, tak je potřeba použít techniku mikroskopie, pro rychlé a přenosné měření optické čítače a pro přesné měření měřiče specializované na měření aerodynamického průměru. V experimentální části byly využity 3 různé způsoby měření a tato měření mi dovolily porovnat tyto metody a zjistit jejich výhody a nevýhody.

9. Seznam použitých značek a symbolů

| <i>Písmeno</i> | <i>Název</i> | <i>Jednotka</i> |
|----------------|---|-----------------|
| D | aerodynamický průměr | μm |
| Δ | diferenciální množství částic | - |
| $dN/d\log D_p$ | množství částic v závislosti na velikosti | - |

10. Seznam zdrojů

- [1] DOLEŽALOVÁ, Eva. *Změny obsahu kyslíku v ovzduší*. Zlín, 2011.
- [2] Atmosféra Země. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Atmosf%C3%A9ra_Zem%C4%9B
- [3] KRÁTKÝ, Š. Porovnání vodní dýmky, elektronických cigaret a klasických cigaret z hlediska emitovaných částic. Brno, 2015.
- [4] BĚLKA, Miloslav. Depozice prachových částic z ovzduší. Brno, 2012.
- [5] HINDS, William C. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. New York: Wiley, c1999. ISBN 04-711-9410-7.
- [6] SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE [online]. 2015 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/IV1_PM_CZ.html
- [7] Látky znečišťující ovzduší. *ARNIKA* [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://arnika.org/latky-znecistujici-ovzdusi>
- [8] Vliv činnosti člověka na životní prostředí. *ČLOVĚK A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://bonds1.wz.cz/vliv.html>
- [9] BARON, Paul A. a Klaus. WILLEKE. *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. 2nd ed. New York: Wiley, 2001. ISBN 04-713-5636-0.
- [10] Aerodynamic Particle Sizer (APS) Spectrometer 3321. TSI Incorporated [online]. Cardigan Road: TSI, 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.tsi.com/aerodynamic-particle-sizer-spectrometer-3321/>
- [11] TSI. Model 3321 Aerodynamic particle sizer. Operation and service manual. In. TSI incorporated, Shoreview, USA, 2006.
- [12] Andersen Cascade Impactor (ACI). *Copley Scientific* [online]. Nottingham: Copley Scientific, 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.copleyscientific.com/home/inhaler-testing/aerodynamic-particle-size/andersen-cascade-impactor-aci>
- [13] How do Particle Counters work? In: *Particle counters* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.particlecounters.org/blog/how-do-particle-counters-work/>
- [14] Lighthouse Worldwide Solutions. SOLAIR 3100 Airborne particle counters. Operation and service manuals, Fremont, USA, 2008.
- [15] POKORNÝ, Pavel. Světelná mikroskopie a její aplikace. Brno, 2010.
- [16] Kolektiv autorů. Encyklopedie laboratorní medicíny pro klinickou praxi [online]. Verze 12. 2014 [cit. 2017-04-17]. ISBN 80 – 238 – 9775 – 6. Dostupné z: <http://www.enclabmed.cz/encyklopedie/A/JVAUJ.htm>

[17] *Phase Contrast Microscopy* [online] [cit. 2017-04-17]. Dostupné z:
<https://cellularphysiology.wikispaces.com/Phase+Contrast+Microscopy>

11. Přílohy

Tab. 1 Naměřené hodnoty niklových částic

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 105,106 |
| 0,542 | 63,7427 |
| 0,583 | 79,9664 |
| 0,626 | 98,686 |
| 0,673 | 109,246 |
| 0,723 | 127,773 |
| 0,777 | 139,005 |
| 0,835 | 160,125 |
| 0,898 | 163,581 |
| 0,965 | 164,637 |
| 1,037 | 174,621 |
| 1,114 | 166,077 |
| 1,197 | 156,765 |
| 1,286 | 151,005 |
| 1,382 | 148,701 |
| 1,486 | 137,949 |
| 1,596 | 131,709 |
| 1,715 | 121,342 |
| 1,843 | 130,365 |
| 1,981 | 127,677 |
| 2,129 | 152,925 |
| 2,288 | 173,181 |
| 2,458 | 242,011 |
| 2,642 | 318,714 |
| 2,839 | 396,088 |
| 3,051 | 413,464 |
| 3,278 | 441,975 |
| 3,523 | 465,879 |
| 3,786 | 461,271 |
| 4,068 | 407,896 |
| 4,371 | 395,224 |
| 4,698 | 367,865 |
| 5,048 | 305,37 |
| 5,425 | 289,242 |
| 5,829 | 264,667 |
| 6,264 | 217,628 |
| 6,732 | 184,796 |
| 7,234 | 149,757 |

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 103,402 |
| 0,542 | 57,5988 |
| 0,583 | 72,6705 |
| 0,626 | 94,5581 |
| 0,673 | 109,342 |
| 0,723 | 118,558 |
| 0,777 | 134,589 |
| 0,835 | 148,989 |
| 0,898 | 153,981 |
| 0,965 | 151,581 |
| 1,037 | 159,645 |
| 1,114 | 162,813 |
| 1,197 | 149,373 |
| 1,286 | 142,845 |
| 1,382 | 139,677 |
| 1,486 | 128,061 |
| 1,596 | 130,461 |
| 1,715 | 118,27 |
| 1,843 | 129,021 |
| 1,981 | 132,573 |
| 2,129 | 146,781 |
| 2,288 | 173,277 |
| 2,458 | 249,979 |
| 2,642 | 321,498 |
| 2,839 | 396,28 |
| 3,051 | 431,127 |
| 3,278 | 448,407 |
| 3,523 | 476,054 |
| 3,786 | 465,975 |
| 4,068 | 434,007 |
| 4,371 | 394,168 |
| 4,698 | 379,384 |
| 5,048 | 332,441 |
| 5,425 | 304,506 |
| 5,829 | 292,506 |
| 6,264 | 237,691 |
| 6,732 | 198,044 |
| 7,234 | 153,693 |

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 81,8024 |
| 0,542 | 41,3752 |
| 0,583 | 51,263 |
| 0,626 | 65,9507 |
| 0,673 | 78,1424 |
| 0,723 | 91,2942 |
| 0,777 | 103,582 |
| 0,835 | 112,51 |
| 0,898 | 124,798 |
| 0,965 | 121,822 |
| 1,037 | 124,894 |
| 1,114 | 121,918 |
| 1,197 | 119,998 |
| 1,286 | 115,486 |
| 1,382 | 113,566 |
| 1,486 | 104,734 |
| 1,596 | 95,9981 |
| 1,715 | 92,7341 |
| 1,843 | 100,894 |
| 1,981 | 104,638 |
| 2,129 | 129,789 |
| 2,288 | 160,701 |
| 2,458 | 235,675 |
| 2,642 | 306,138 |
| 2,839 | 411,256 |
| 3,051 | 428,823 |
| 3,278 | 458,775 |
| 3,523 | 478,934 |
| 3,786 | 477,014 |
| 4,068 | 445,911 |
| 4,371 | 417,784 |
| 4,698 | 404,344 |
| 5,048 | 346,457 |
| 5,425 | 316,122 |
| 5,829 | 311,706 |
| 6,264 | 256,699 |
| 6,732 | 219,548 |
| 7,234 | 173,949 |

| | |
|-------|----------|
| 7,774 | 118,942 |
| 8,354 | 100,798 |
| 8,977 | 83,9983 |
| 9,647 | 75,9345 |
| 10,37 | 65,3747 |
| 11,14 | 44,4471 |
| 11,97 | 33,4073 |
| 12,86 | 34,1753 |
| 13,82 | 21,5036 |
| 14,86 | 13,1517 |
| 15,96 | 4,8959 |
| 17,15 | 1,43997 |
| 18,43 | 0,47999 |
| 19,81 | 0,191996 |

| | |
|-------|----------|
| 7,774 | 130,077 |
| 8,354 | 102,814 |
| 8,977 | 94,5581 |
| 9,647 | 82,4624 |
| 10,37 | 70,0786 |
| 11,14 | 45,9831 |
| 11,97 | 37,5352 |
| 12,86 | 35,6153 |
| 13,82 | 26,9755 |
| 14,86 | 15,3597 |
| 15,96 | 4,03192 |
| 17,15 | 1,43997 |
| 18,43 | 0,47999 |
| 19,81 | 0,287994 |

| | |
|-------|----------|
| 7,774 | 153,117 |
| 8,354 | 127,581 |
| 8,977 | 111,262 |
| 9,647 | 97,822 |
| 10,37 | 89,2782 |
| 11,14 | 60,1908 |
| 11,97 | 44,2551 |
| 12,86 | 45,7911 |
| 13,82 | 29,8554 |
| 14,86 | 19,5836 |
| 15,96 | 9,02382 |
| 17,15 | 2,30395 |
| 18,43 | 0,287994 |
| 19,81 | 0,383992 |

Tab. 2 Naměřené hodnoty částic chitosanu

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 339,497 |
| 0,542 | 347,705 |
| 0,583 | 515,318 |
| 0,626 | 657,011 |
| 0,673 | 744,081 |
| 0,723 | 814,256 |
| 0,777 | 871,951 |
| 0,835 | 872,911 |
| 0,898 | 784,688 |
| 0,965 | 725,937 |
| 1,037 | 743,217 |
| 1,114 | 710,674 |
| 1,197 | 646,067 |
| 1,286 | 643,667 |
| 1,382 | 709,138 |
| 1,486 | 730,065 |
| 1,596 | 810,896 |
| 1,715 | 953,261 |
| 1,843 | 1221,86 |
| 1,981 | 1468 |
| 2,129 | 1945,4 |
| 2,288 | 2466,57 |
| 2,458 | 3493,56 |
| 2,642 | 4477,35 |

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 365,357 |
| 0,542 | 378,52 |
| 0,583 | 555,829 |
| 0,626 | 708,754 |
| 0,673 | 816,56 |
| 0,723 | 887,31 |
| 0,777 | 948,845 |
| 0,835 | 951,821 |
| 0,898 | 885,486 |
| 0,965 | 814,928 |
| 1,037 | 819,056 |
| 1,114 | 792,176 |
| 1,197 | 722,098 |
| 1,286 | 744,657 |
| 1,382 | 789,296 |
| 1,486 | 808,88 |
| 1,596 | 937,517 |
| 1,715 | 1067,79 |
| 1,843 | 1402,44 |
| 1,981 | 1660,96 |
| 2,129 | 2238,87 |
| 2,288 | 2848,55 |
| 2,458 | 3895,6 |
| 2,642 | 4973,18 |

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 359,981 |
| 0,542 | 394,552 |
| 0,583 | 610,164 |
| 0,626 | 815,792 |
| 0,673 | 926,093 |
| 0,723 | 988,012 |
| 0,777 | 1070,19 |
| 0,835 | 1066,92 |
| 0,898 | 962,381 |
| 0,965 | 867,439 |
| 1,037 | 856,975 |
| 1,114 | 842,287 |
| 1,197 | 763,281 |
| 1,286 | 768,561 |
| 1,382 | 803,12 |
| 1,486 | 815,888 |
| 1,596 | 925,038 |
| 1,715 | 1060,49 |
| 1,843 | 1362,98 |
| 1,981 | 1634,94 |
| 2,129 | 2166,39 |
| 2,288 | 2722,12 |
| 2,458 | 3805,56 |
| 2,642 | 4780,42 |

| | |
|-------|---------|
| 2,839 | 5278,55 |
| 3,051 | 5233,82 |
| 3,278 | 5379,83 |
| 3,523 | 5308,79 |
| 3,786 | 4862,59 |
| 4,068 | 4139,25 |
| 4,371 | 3545,21 |
| 4,698 | 3071,75 |
| 5,048 | 2462,93 |
| 5,425 | 1964,22 |
| 5,829 | 1684,67 |
| 6,264 | 1313,83 |
| 6,732 | 1025,74 |
| 7,234 | 746,193 |
| 7,774 | 504,374 |
| 8,354 | 326,777 |
| 8,977 | 227,131 |
| 9,647 | 148,797 |
| 10,37 | 102,622 |
| 11,14 | 68,8306 |
| 11,97 | 42,8151 |
| 12,86 | 29,1834 |
| 13,82 | 18,5276 |
| 14,86 | 9,38 |
| 15,96 | 4,19 |
| 17,15 | 2,59195 |
| 18,43 | 1,53597 |
| 19,81 | 1,05598 |

| | |
|-------|----------|
| 2,839 | 5835,53 |
| 3,051 | 5707,47 |
| 3,278 | 5820,56 |
| 3,523 | 5675,12 |
| 3,786 | 5188,89 |
| 4,068 | 4362,92 |
| 4,371 | 3695,54 |
| 4,698 | 3184,35 |
| 5,048 | 2524,27 |
| 5,425 | 1997,82 |
| 5,829 | 1724,32 |
| 6,264 | 1303,46 |
| 6,732 | 1054,25 |
| 7,234 | 751,569 |
| 7,774 | 499,862 |
| 8,354 | 328,217 |
| 8,977 | 217,052 |
| 9,647 | 154,269 |
| 10,37 | 97,5341 |
| 11,14 | 65,9507 |
| 11,97 | 43,0071 |
| 12,86 | 26,6875 |
| 13,82 | 17,3757 |
| 14,86 | 9,11982 |
| 15,96 | 4,19 |
| 17,15 | 1,91996 |
| 18,43 | 1,53597 |
| 19,81 | 0,287994 |

| | |
|-------|----------|
| 2,839 | 5699,89 |
| 3,051 | 5517,68 |
| 3,278 | 5619,06 |
| 3,523 | 5489,17 |
| 3,786 | 4992,48 |
| 4,068 | 4218,83 |
| 4,371 | 3518,62 |
| 4,698 | 3076,83 |
| 5,048 | 2451,89 |
| 5,425 | 1926,3 |
| 5,829 | 1634,08 |
| 6,264 | 1251,43 |
| 6,732 | 1006,35 |
| 7,234 | 713,938 |
| 7,774 | 474,135 |
| 8,354 | 303,162 |
| 8,977 | 205,628 |
| 9,647 | 127,773 |
| 10,37 | 86,7823 |
| 11,14 | 54,2389 |
| 11,97 | 41,0872 |
| 12,86 | 24,5755 |
| 13,82 | 11,58 |
| 14,86 | 6,43187 |
| 15,96 | 4,22392 |
| 17,15 | 2,30395 |
| 18,43 | 0,959981 |
| 19,81 | 0,191996 |

Tab. 3 Naměřené hodnoty křemičitých částic

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 454,035 |
| 0,542 | 312,762 |
| 0,583 | 383,224 |
| 0,626 | 433,143 |
| 0,673 | 448,503 |
| 0,723 | 434,871 |
| 0,777 | 429,495 |
| 0,835 | 394,936 |
| 0,898 | 339,833 |
| 0,965 | 314,202 |

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 474,879 |
| 0,542 | 343,001 |
| 0,583 | 410,776 |
| 0,626 | 427,287 |
| 0,673 | 452,151 |
| 0,723 | 433,719 |
| 0,777 | 403,768 |
| 0,835 | 371,129 |
| 0,898 | 322,266 |
| 0,965 | 281,85 |

| D [μm] | dN/dlogDp [-] |
|--------|---------------|
| 0,523 | 483,074 |
| 0,542 | 350,969 |
| 0,583 | 415,768 |
| 0,626 | 458,199 |
| 0,673 | 453,207 |
| 0,723 | 436,023 |
| 0,777 | 412,6 |
| 0,835 | 385,624 |
| 0,898 | 345,497 |
| 0,965 | 293,946 |

| | |
|-------|----------|
| 1,037 | 265,915 |
| 1,114 | 230,299 |
| 1,197 | 196,7 |
| 1,286 | 171,741 |
| 1,382 | 151,101 |
| 1,486 | 135,165 |
| 1,596 | 128,445 |
| 1,715 | 116,446 |
| 1,843 | 114,238 |
| 1,981 | 117,406 |
| 2,129 | 142,269 |
| 2,288 | 167,133 |
| 2,458 | 216,284 |
| 2,642 | 285,21 |
| 2,839 | 399,64 |
| 3,051 | 542,677 |
| 3,278 | 822,992 |
| 3,523 | 1273,89 |
| 3,786 | 1785,85 |
| 4,068 | 2171,19 |
| 4,371 | 2212,76 |
| 4,698 | 1839,42 |
| 5,048 | 1277,54 |
| 5,425 | 769,329 |
| 5,829 | 422,2 |
| 6,264 | 226,075 |
| 6,732 | 128,061 |
| 7,234 | 72,0946 |
| 7,774 | 52,223 |
| 8,354 | 33,8873 |
| 8,977 | 23,7115 |
| 9,647 | 16,4157 |
| 10,37 | 14,6877 |
| 11,14 | 9,21582 |
| 11,97 | 7,67985 |
| 12,86 | 5,85588 |
| 13,82 | 2,11196 |
| 14,86 | 1,72797 |
| 15,96 | 0,863983 |
| 17,15 | 0,863983 |
| 18,43 | 0,671987 |

| | |
|-------|----------|
| 1,037 | 255,931 |
| 1,114 | 221,084 |
| 1,197 | 188,252 |
| 1,286 | 158,301 |
| 1,382 | 146,973 |
| 1,486 | 127,101 |
| 1,596 | 115,198 |
| 1,715 | 106,174 |
| 1,843 | 98,686 |
| 1,981 | 108,478 |
| 2,129 | 117,214 |
| 2,288 | 148,701 |
| 2,458 | 184,028 |
| 2,642 | 252,571 |
| 2,839 | 351,929 |
| 3,051 | 508,982 |
| 3,278 | 816,368 |
| 3,523 | 1311,05 |
| 3,786 | 1822,91 |
| 4,068 | 2187,22 |
| 4,371 | 2134,61 |
| 4,698 | 1711,74 |
| 5,048 | 1159,08 |
| 5,425 | 658,259 |
| 5,829 | 347,129 |
| 6,264 | 175,1 |
| 6,732 | 97,4381 |
| 7,234 | 61,4388 |
| 7,774 | 33,5033 |
| 8,354 | 23,6155 |
| 8,977 | 16,2237 |
| 9,647 | 14,3037 |
| 10,37 | 8,35183 |
| 11,14 | 7,19986 |
| 11,97 | 4,41591 |
| 12,86 | 4,12792 |
| 13,82 | 1,63197 |
| 14,86 | 2,01596 |
| 15,96 | 0,671987 |
| 17,15 | 0,863983 |
| 18,43 | 1,15198 |

| | |
|-------|---------|
| 1,037 | 259,387 |
| 1,114 | 222,62 |
| 1,197 | 195,164 |
| 1,286 | 166,365 |
| 1,382 | 147,549 |
| 1,486 | 138,333 |
| 1,596 | 119,806 |
| 1,715 | 117,886 |
| 1,843 | 108,574 |
| 1,981 | 107,038 |
| 2,129 | 125,277 |
| 2,288 | 148,509 |
| 2,458 | 194,012 |
| 2,642 | 255,259 |
| 2,839 | 361,913 |
| 3,051 | 513,494 |
| 3,278 | 845,839 |
| 3,523 | 1320,07 |
| 3,786 | 1887,51 |
| 4,068 | 2261,52 |
| 4,371 | 2226,29 |
| 4,698 | 1791,32 |
| 5,048 | 1204,49 |
| 5,425 | 684,946 |
| 5,829 | 365,081 |
| 6,264 | 187,772 |
| 6,732 | 102,046 |
| 7,234 | 59,9028 |
| 7,774 | 34,4633 |
| 8,354 | 24,7675 |
| 8,977 | 15,7437 |
| 9,647 | 12,97 |
| 10,37 | 11,0398 |
| 11,14 | 7,67985 |
| 11,97 | 5,85588 |
| 12,86 | 4,99 |
| 13,82 | 2,01596 |
| 14,86 | 1,24798 |
| 15,96 | 1,53597 |
| 17,15 | 1,15198 |
| 18,43 | 0,47999 |

| | |
|-------|----------|
| 19,81 | 0,671987 |
|-------|----------|

| | |
|-------|----------|
| 19,81 | 0,383992 |
|-------|----------|

| | |
|-------|----------|
| 19,81 | 0,575988 |
|-------|----------|